INVESTIGACION y CIENCIA

Julio de 1992 Número 190

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



## SECCIONES

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

**Asesoramiento y traducción:**

Esther Aznar Muñoz: *La pandemia del SIDA*; Esteban Santiago: *Funciones biológicas del óxido nitrico*; Ramón Pascual: *Nebulosas planetarias*; Luis Bou: *Puntos ciegos*; Amando García: *Optica binaria*; Manuel García Doncel: *Heisenberg, imprecisión y revolución cuántica*; José M. García de la Mora: *Restos que hablan*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

**Ciencia y sociedad:**

M. Puigcerver, V. Cabrera y F. Bernaldo de Quirós, Celia Marrasé, Ana Mª García y Juan P. Adrados

**Ciencia y empresa:**

Manuel Puigcerver y Pascual Capilla

**Libros:**

E. Rodríguez Ocaña, J. González León, Joandomènec Ros y Luis Alonso

## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

| Página | Fuente |
|---|---|
| 5 | Mike Goldwater, Matrix |
| 6-7 | Laurie Grace |
| 8 | Antonio Aragón |
| 9-10 | Majid Fotuhi, Universidad Johns Hopkins |
| 13 | Majid Fotuhi |
| 14-15 | Tomo Narashima |
| 16 | Tomo Narashima (*arriba*), Johnny Johnson (*abajo*) |
| 17 | S. H. Snyder y David S. Bdredt |
| 18 | Johnny Johnson |
| 19 | Tomo Narashima |
| 23 | Bruce Balick, Universidad de Washington |
| 24 | George Retseck |
| 25 | George Retseck (*arriba*), Philip Plait, Univ. de Virginia (*abajo*) |
| 26 | J. Johnson (*arriba*), David F. Malin, Observatorio Anglo-Australiano (*abajo*) |
| 27 | David F. Malin |
| 28-29 | George Retseck |
| 44-49 | Johnny Johnson |
| 53 | Wilfrid B. Veldkamp |
| 54 | Paul Wallich |
| 55 | Jarid Schneidman |
| 56 | Wilfrid B. Veldkamp (*arriba*), Laurie Grace (*abajo*) |
| 57 | Wilfrid B. Veldkamp |
| 61 | M. Teresa Ortiz y Expogràfic, S. A. |
| 62 | Juan Soler Cruz |
| 63 | E. Poyatos (*arriba*), M. Teresa Ortiz (*abajo*) |
| 64 | Expogràfic, S. A. |
| 67 | Archivos W. Heisenberg, Inst. de Física Max Planck, Munich |
| 68 | Archivos W. Heisenberg, Inst. de Física Max Planck (*a-c*); Archivo Bettmann (*d*): Inst. Americano de Física, Niels Bohr Photo Library (*e*); Archivo Niels Bohr, Copenhague (*f*); AIP, Niels Bohr Photo Library (g); Archivos de W. Heisenberg (*h*) |



LA PORTADA representa una versión idealizada de Hélice, brillante nebulosa planetaria situada a 500 años luz de la Tierra. La nebulosa consiste en un globo de gas en expansión, cuyo diámetro actual es de cinco años luz, que se formó cuando una estrella moribunda expulsó sus capas exteriores (véase "Nebulosas planetarias", por Noam Soker, en este mismo número). La radiación ultravioleta del caliente remanente estelar del centro hace que el gas resplandezca. (Ilustración de la portada de George Retseck y David Malin.)


**INVESTIGACION Y CIENCIA**

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

**SCIENTIFIC AMERICAN**

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

**Precios de suscripción, en pesetas:**

| | Un año | Dos años |
|---|---|---|
| España | 6.600 | 12.000 |
| Extranjero | 7.300 | 13.400 |

**Ejemplares sueltos:**

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

**para España:**

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

**para los restantes países:**

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45
Fax 409 70 46




# Heisenberg, imprecisión y revolución cuántica

*A sus 32 años, Werner Heisenberg fue uno de los científicos más jóvenes entre los galardonados con el Nobel. Tras uno de los principios fundamentales de la física, se halla una historia de ambición y feroz competencia*

David C. Cassidy

Entre los muchos logros científicos del siglo XX, quizás el fundamental sea la mecánica cuántica. Ideada por un puñado de físicos europeos de mente preclara, la ciencia del átomo exige transformaciones profundas y controvertidas en nuestra comprensión de la naturaleza. La materia puede consistir en ondas o en partículas, según como la observemos; la causa y el efecto ya no están íntimamente conectados. Esta interpretación de la mecánica cuántica —las prescripciones sobre el cómo y el cuándo de su uso y sobre qué nos dice del mundo físico— fue elaborada en Copenhague en 1927. Debido a la difusión que le dieron sus creadores y al éxito sorprendente que obtuvieron sus partidarios, la interpretación de Copenhague adquirió ya en los años treinta el prestigio de que goza hoy. Pero una "interpretación" no es más que eso. Su origen, defensa y aceptación pudieron haber sido, en aspectos importantes, fruto de circunstancias históricas y preferencias personales, tanto como de su validez científica.

DAVID C. CASSIDY, profesor de la Universidad de Hofstra, ha intervenido en la edición de los *Collected Papers of Albert Einstein*. Se doctoró en historia de las ciencias por la Universidad de Purdue en 1976. Residió seis años en Alemania, primero como becario Alexander von Humboldt en la Universidad de Stuttgart y después como profesor asistente en la Universidad de Ratisbona, intervalo que le permitió acometer una investigación rigurosa sobre Heisenberg y la historia de la ciencia alemana. Acaba de aparecer, en la editorial W. H. Freeman and Company, su libro *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*.

El papel desempeñado en la ciencia por el talante del hombre queda ejemplificado, quizás como en ningún otro caso, en uno de los principales inventores y más activos defensores de la interpretación de Copenhague, Werner Karl Heisenberg. Ocurrió en febrero de 1927, y tenía 25 años, cuando este asistente postdoctoral de Niels Bohr formuló lo que constituye su contribución más famosa en el dominio de la física y es elemento clave para la interpretación de Copenhague: el principio de imprecisión o indeterminación. Como la interpretación de Copenhague, este principio puede considerarse el resultado de la búsqueda de un método coherente de conectar el mundo cotidiano del laboratorio con ese mundo, nuevo y extraño, propio del minúsculo átomo.

Dicho brevemente, el principio de imprecisión afirma que la medida simultánea de dos variables llamadas conjugadas, como la posición y el momento lineal de una partícula en movimiento, impone necesariamente una limitación en la precisión. Cuanto más precisa sea la medida de la posición, tanto más imprecisa será la medida del momento, y viceversa. En el caso extremo, la precisión absoluta de una de las variables implicaría imprecisión absoluta respecto a la otra. (N. del T.: Se traduce sistemáticamente por imprecisión el término inglés *uncertainty*, con el que vino a expresarse el adjetivo original alemán *unscharf*. Se pretende con ello eliminar toda acepción psicológica, de estado de la mente, que conlleva el término castellano incertidumbre. Tal acepción es totalmente ausente tanto en Heisenberg como en Cassidy.)

Esta indeterminación no debe achacarse al experimentador, sino que se trata de una consecuencia fundamental de las ecuaciones cuánticas y es característica de todo experimento cuántico. Más aún, Heisenberg declaró absolutamente inevitable el principio de imprecisión, en la medida en que fuera válida la mecánica cuántica. Era la primera vez, desde la revolución científica, que un físico de primera línea proclamaba una limitación al conocimiento científico.

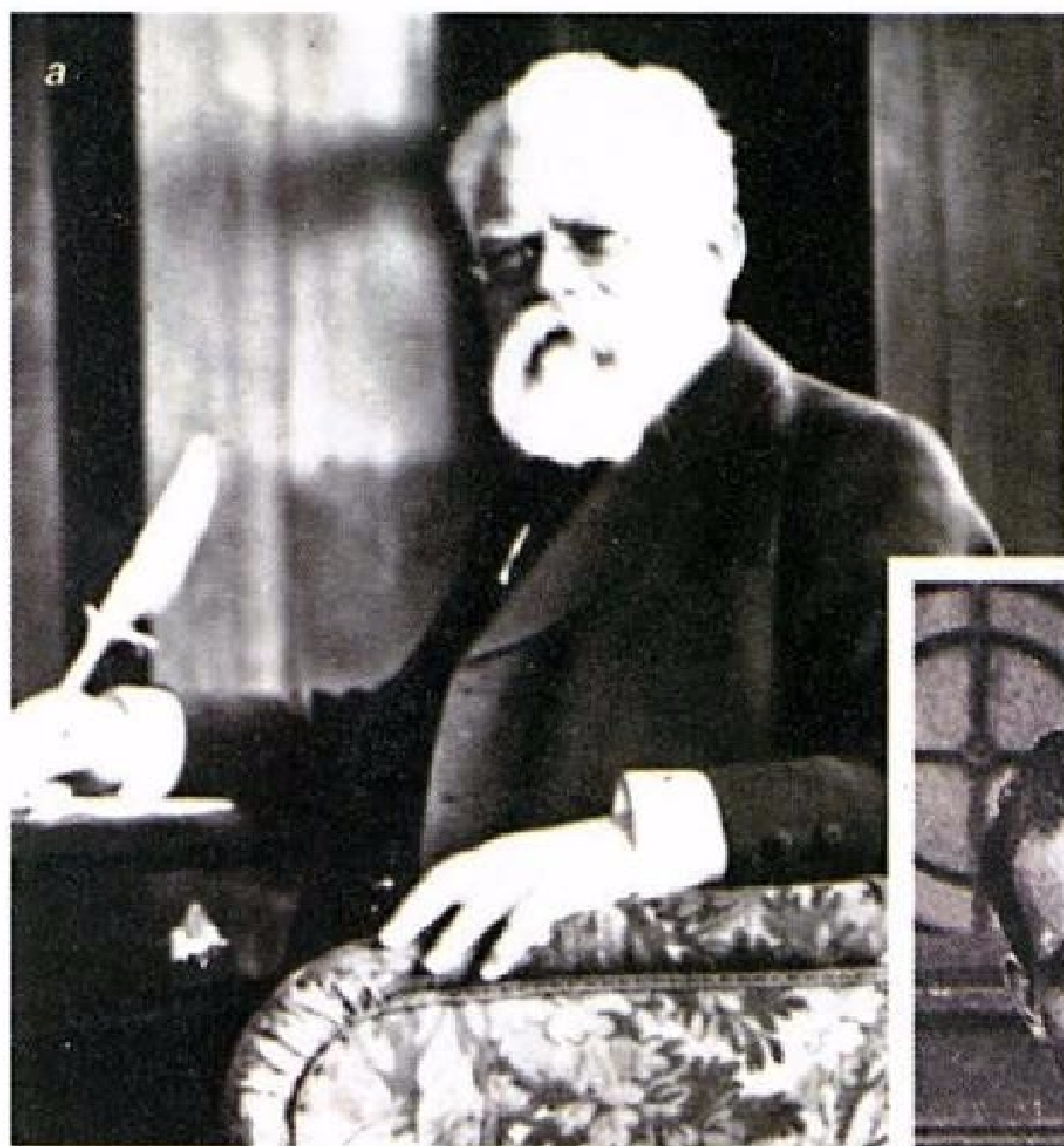
Junto con las ideas de Bohr y Max Born (otras lumbreras), el principio de imprecisión de Heisenberg constituía el sistema lógicamente cerrado de la interpretación de Copenhague, que Heisenberg y Born proclamaron completa e irrevocable ante una reunión de los principales físicos cuánticos en octubre de 1927, con motivo del quinto congreso Solvay sobre física fundamental celebrado en Bruselas. A las pocas semanas de ese acontecimiento, Heisenberg fue nominado para la cátedra de física teórica de la Universidad de Leipzig. Con sólo 25 años, era el catedrático más joven de Alemania.

La extrema juventud de Heisenberg en el momento de su obra más significativa señala un rasgo característico que habría de definir a toda su investigación de primera hora: el ansia casi insaciable de éxito académico y la necesidad de destacar como el mejor en todo lo que hacía. De ese estado de ánimo podemos rastrear su explicación hasta el entorno familiar.

Los Heisenberg eran una familia muy culta y ambiciosa, que fue escalando peldaños hasta instalarse en la clase media alta de la sociedad germana. La unificación de Alemania bajo Otto von Bismarck hacia finales del siglo XIX, con el vigoroso crecimiento consiguiente de la economía, había creado una apremiante necesidad de burócratas, diplomáticos, jue-



**1. WERNER HEISENBERG realizó sus principales aportaciones a la física cuando apenas contaba ventitantos años de edad. La fotografía se tomó hacia 1924, en la Universidad de Gotinga, donde impartió la clase que le habilitó para una cátedra.**


a

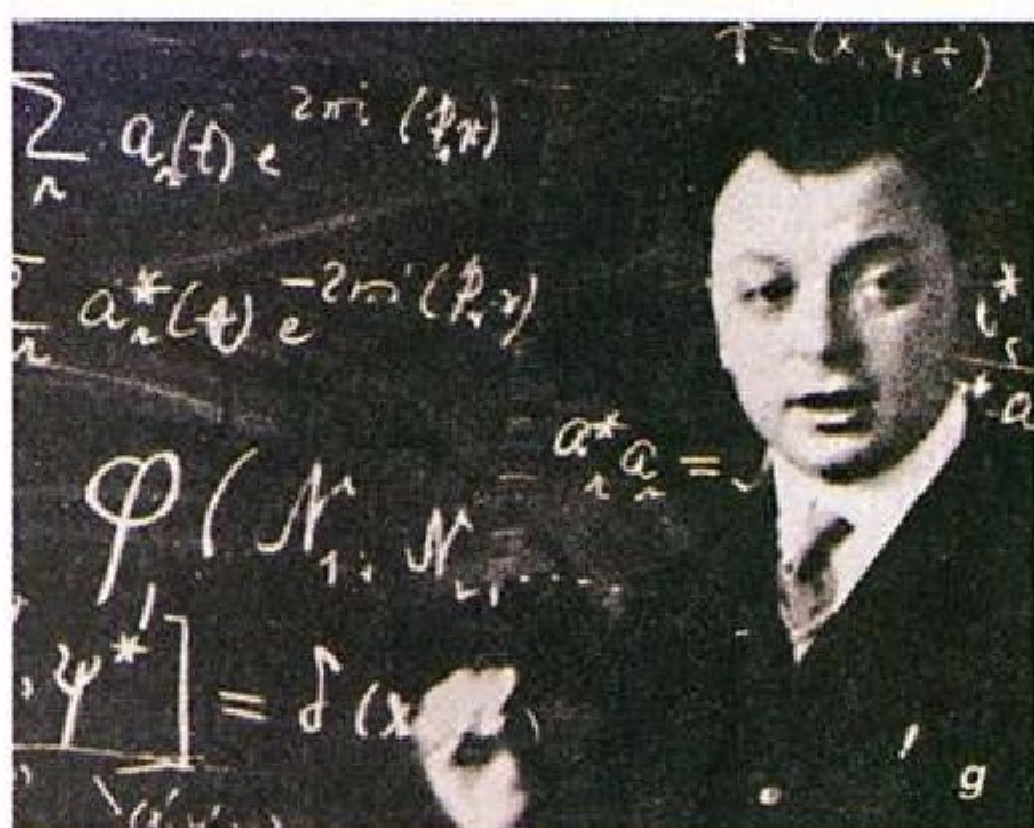

b


c


f


d


e


g


h

ces, abogados y empresarios. En consecuencia, las nuevas universidades y escuelas conocieron un espectacular despegue. Y se prestigió el reconocimiento y la remuneración económica de los docentes y de sus alumnos más brillantes.

Tanto el padre de Werner, August, como su abuelo materno, Nikolaus Wecklein, se habían remontando desde sus orígenes humildes hasta la cumbre de la alta burguesía alemana mediante logros académicos. Wecklein era director de un renombrado instituto (Gymnasium) de Munich, y August en 1910 fue nombrado profesor de filología bizantina en la Universidad de Munich. Ambos contrajeron matrimonio dentro de su nueva situación social.

Desde su mismo nacimiento en 1901, la familia de Werner decidió que él persistiera también en ese nivel privilegiado mediante una cómoda situación académica. Creyendo que la competencia alentaría el éxito en los estudios, August estimuló la rivalidad entre Werner y su hermano mayor, Erwin. Durante años los dos muchachos pugnaron sin cuartel, hasta que un día la lucha acabó en una pelea violenta con las sillas como armas. Llegados a la edad adulta, cada uno siguió su propio camino —Erwin se trasladó a Berlín y se hizo químico— y, fuera de esporádicas reuniones familiares, tuvieron poco contacto.

La ambición de Werner por alcanzar la cumbre se evidencia con claridad durante el período comprendido entre julio de 1925, cuando desarrolló, con sus colegas Born y Pascual Jordan, una descripción matemática de la mecánica cuántica, y febrero de 1927, cuando formuló las relaciones de imprecisión. La confluencia de dos procesos convirtió en determinante ese afán durante dicho intervalo.

En primer lugar, varias cátedras de física teórica quedaron de repente vacantes en la Europa central de lengua alemana. Esos cargos constituían una gran oportunidad para un académico ambicioso como Heisenberg, que ya se había habilitado en la Universidad de Gotinga, es decir, había sido reconocido apto para ocupar una cátedra de enseñanza universitaria.

En segundo lugar, y quizá más importante, fue la aparición de una descripción matemática nueva y rival de la mecánica cuántica. Heisenberg y sus colegas habían desarrollado en 1925 un formalismo de la mecánica cuántica, basado en las matemáticas abstractas del cálculo matricial. Para sus autores, esta "mecánica matricial" incardinaba su voluntad de fundarse, de manera exclusiva, en magnitudes observables en el laboratorio. Sostenían puntos esenciales como la existencia de saltos cuánticos y discontinuidades en los átomos, y rechazaban la idea de modelos atómicos visualizables (*anschaulich*).

Erwin Schrödinger, un físico vienés de 39 años que trabajaba entonces en Zurich, atacaba los enigmas de la física atómica desde un punto de vista totalmente distinto y con objetivos enteramente otros. En una serie de artículos publicados durante la primera mitad de 1926, Schrödinger presentaba una ecuación de ondas cuántica, basada en una hipótesis que había propuesto el doctorando francés Louis de Broglie. La idea, recibida favorablemente por Einstein, era que toda materia en movimiento podía considerarse como ondas. Schrödinger, sirviéndose de esa noción, aducía que las "ondas de materia" del electrón excitaban modos armónicos de vibración en el interior del átomo. Estos armónicos reemplazaban los estados atómicos estacionarios de la teoría matricial; en vez de saltos cuánticos discontinuos, había transiciones continuas de un armónico a otro. Si eso era verdad, Schrödinger tornaba inútiles los puntos fundamentales de la mecánica matricial de Heisenberg.

La mayoría de los físicos acogieron con satisfacción el enfoque más familiar de Schrödinger, atendiendo poco a su manera de interpretarlo. Esta situación cambió bruscamente en mayo de 1926, cuando Schrödinger publicó una prueba de que los dos formalismos rivales eran, de hecho, matemáticamente equivalentes. Heisenberg y sus colegas matriciales repusieron su causa y lo hicieron en términos que fueron adquiriendo por ambas partes tonos emocionales crecientes.

Schrödinger no se mostraba muy cooperador. En su artículo sobre la equivalencia no pondera por igual los dos esquemas opuestos, sino que resaltaba la superioridad del suyo propio. En una famosa nota al pie, llegó a escribir: "No veo ninguna conexión genética de ningún tipo [entre el trabajo de Heisenberg y el mío propio]. Por supuesto que conocía su teoría, pero me sentía desanimado, por no decir repelido, por los métodos de álgebra trascendental, que a mí me parecieron difíciles, y por la falta de visualizabilidad [*Anschaulichkeit*]."

En carta a su íntimo colega Wolfgang Pauli, Heisenberg respondía en el mismo tono: "Cuanto más pienso en el aspecto físico de la teoría de Schrödinger, más repulsiva la encuentro... Lo que escribe Schrödinger sobre la visualizabilidad de su teoría 'probablemente no es del todo correcto' [eco de una expresión típica de Bohr], en otras palabras, es basura [*Mist*]." La única ventaja del método de Schrödinger, decía a quien quisiera oírlo, es que permite un cálculo simple de las probabilidades de transición atómicas, o probabilidades de saltos cuánticos, para poder insertarlas en las matrices de la mecánica cuántica. Pauli estaba de acuerdo.

Una lectura detenida de las observaciones nos revela que lo que provocó el conflicto no era la equivalencia (Pauli la había probado sin más ni más un mes antes), sino lo que cada bando sacaba de ella. Heisenberg y su escuela matricial se habían empeñado a fondo en las propiedades de la naturaleza que creían existir y estar incorporadas en su mecánica matricial. Habían apostado su futuro en ese enfoque. Schrödinger había arriesgado su reputación en eliminar la discontinuidad y los saltos cuánticos al parecer irracionales, resucitando la física de los movimientos ondulatorios, racionales, causales y continuos. Ninguno de los dos bandos estaba dispuesto a conceder al otro la superioridad, y su probable consecuencia —el predominio profesional—. Se debatía nada menos que la naturaleza de la orientación futura de la mecánica cuántica.

Este desacuerdo espoleó aún más

**2. PERSONAS QUE INFLUYERON en la vida de Heisenberg. Debemos empezar por su abuelo, Nikolaus Wecklein (*a*), y su padre, August, que aparece con su esposa, Anna, y sus hijos, Erwin (*de pie*) y Werner (*b*). Abuelo y progenitor inculcaron afán de triunfo académico en los dos muchachos. Heisenberg estudió con Niels Bohr (*c*), con quien más tarde desarrolló la interpretación de Copenhague. Uno de los primeros rivales de Heisenberg fue Erwin Schrödinger (*d*), cuyo formalismo ondulatorio constituía un reto a la mecánica matricial, elaborada por Heisenberg con Max Born (*e*) y Pascual Jordan (*f, a la derecha*). Wolfgang Pauli (*g*) fue una fuerza de primer orden, que ayudó a Heisenberg a elaborar el principio de imprecisión en 1927. En 1929 Heisenberg se embarcó en una vuelta al mundo docente para difundir el "espíritu de Copenhague", llegando a los Estados Unidos, Japón, China y, finalmente, la India (*h*).**

UNIVERSITETETS INSTITUT
FOR
TEORETISK FYSIK

III

**3. CARTA ESCRITA por Heisenberg a Wolfgang Pauli, en que deriva las relaciones de imprecisión para $p$ y $q$, donde $p_1 = \sqrt{2}\,\Delta p$ y $q_1 = \sqrt{2}\,\Delta q$. Este fragmento, tomado de una carta de 14 páginas, fue la base de su artículo sobre el principio de imprecisión.**

la ambición académica de Heisenberg. Una semanas antes de que Schrödinger publicara su prueba de la equivalencia, Heisenberg había renunciado a una plaza de profesor en Leipzig, en favor del puesto de asistente de Bohr en Copenhague. El incrédulo abuelo de Werner, Wecklein, se apresuró a viajar a Copenhague para disuadir a su nieto de tomar dicha opción, justamente cuando aparecía el artículo de Schrödinger sobre la equivalencia. La presión renovada de Wecklein y el desafío de Schrödinger a las bases de la física matricial redoblaron los esfuerzos de Heisenberg por producir un trabajo de tan alta calidad, que pudiera adquirir amplia reputación profesional y le permitiera, en última instancia, hacerse con alguna otra cátedra vacante.

Pero al menos tres sucesos de 1926 ahondaron el profundo abismo intelectual entre sus propias ideas y el punto de vista de Schrödinger. El primero fueron las conferencias de Schrödinger en Munich sobre su nueva física, a fines de julio. Allí, mezclado en una audiencia multitudinaria, el joven Heisenberg objetaba que la teoría de Schrödinger dejaba sin explicar diversos fenómenos. No logró convencer a nadie, y abandonó desalentado la sala. A continuación, durante la reunión de otoño de los científicos y médicos alemanes, Heisenberg fue testigo del soporte abrumador —y a su juicio desquiciado— en favor de las concepciones de Schrödinger.

Por último, en octubre de 1926 se produjo un tenso debate, aunque en último término inconcluso, entre Bohr y Schrödinger en Copenhague. El resultado final de la disputa fue el reconocimiento de que no se disponía de ninguna interpretación enteramente aceptable, ni del uno ni del otro formalismo cuántico. Quien encontrara tal interpretación, fuera persona o bando, podría dar cumplimiento, expresaba Bohr abiertamente, a sus "deseos" de cómo debiera ser la física del futuro.

Puestas en marcha estas diversas motivaciones —personales, profesionales y científicas—, Heisenberg creyó, en febrero de 1927, haber dado de repente con la interpretación necesaria: el principio de imprecisión. Su progreso intelectual hacia esta idea, a finales de 1926 y principios de 1927, se apoya en la investigación de sus colegas más próximos, especialmente de Jordan y de Paul A. M. Dirac, quienes formularon a la vez la "teoría de transformaciones", una amalgama de matemática ondulatoria y matricial. El objetivo para Heisenberg y sus aliados era, en aquel momento, descubrir un método irrefutable para incorporar las discontinuidades en el formalismo de Dirac y Jordan.

De Pauli recibió Heisenberg un impulso vigorosísimo para la nueva interpretación. En una carta de 19 de octubre de 1926, al tiempo que le informaba de una cátedra vacante en Leipzig, Pauli aplicaba los estados atómicos estacionarios al primer estudio de Born de ondas electrónicas libres. Según sus resultados, han de elegirse variables continuas para el momento lineal $p$ y la posición $q$ de un electrón atómico, pero en su comportamiento cuántico se manifestaba un "punto negro": "Ha de darse por sentado que las variables $p$ están *controladas* y las $q$ *incontroladas*. Esto es, sólo se pueden calcular las probabilidades de determinados cambios de las variables $p$, para unas condiciones iniciales dadas, y *promediando sobre todos los valores posibles de las variable q*." Por tanto, no se puede hablar de un determinado "'camino' de la partícula", escribía Pauli, ni "se puede preguntar simultáneamente sobre el valor de la variable $p$ y la variable $q$".

Heisenberg respondió que estaba "*muy* entusiasmado" con la carta de Pauli y con ese punto negro, sobre el que hubo de reflexionar una y otra vez durante los meses siguientes. El entusiasmo de Heisenberg culminó en una carta de 14 páginas, enviada a Pauli el 23 de febrero de 1927. En ella presentaba prácticamente todos los elementos esenciales del artículo, que enviará a publicar un mes más tarde, titulado "Sobre el contenido intuitivo [*anschaulich*] de la cinemática y la mecánica teórico-cuánticas": el artículo de Heisenberg sobre la imprecisión.

Habiendo deducido las relaciones de imprecisión a partir de razonamientos matemáticos y a partir de experimentos mentales, Heisenberg consideró la concordancia entre ambas deducciones como una prueba de la validez universal de la imprecisión. El argumento matemático comenzaba con una función de ondas correspondiente a una curva en forma de campana o, dicho matemáticamente, a una distribución de probabilidad gaussiana, para la variable $q$. El error en el conocimiento del valor exacto de $q$ (llamado la desviación estándar) es delta $q$, que escribimos $\Delta q$. Usando el formalismo desarrollado por Dirac y Jordan, transformó Heisenberg la distribución gaussiana en la de su variable conjugada $p$.

Al hacerlo, descubrió que, como consecuencia matemática, las desviaciones estándar de las dos distribuciones —es decir, las imprecisiones en los valores de $q$ y $p$— están en relación inversa una respecto a otra. Este ca-

rácter inverso puede generalizarse y expresarse mediante la relación

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{h}{4\pi},$$

donde $h$ es la constante de Planck. A continuación demostró que este resultado no es mero constructo matemático, sino enteramente compatible con cualquier experimento imaginable que implique la medición simultánea de pares de variables conjugadas, como posición y momento lineal, o energía y tiempo.

La compatibilidad con el experimento se basaba, sin embargo, en diversas innovaciones que Heisenberg introducía al objeto de incorporar la discontinuidad y las partículas. Una de ellas era la redefinición del término alemán *anschaulich* (intuitivo) que aparecía en el mismo título de su artículo, para significar "físico" o dotado de significado empírico, más que "visualizable" o pictórico. Con este cambio pretendía neutralizar las críticas de Schrödinger, de que una física de partículas discontinua es esencialmente irracional y *unanschaulich* (no-intuitiva). Lo que se hallaba en íntima relación con otra innovación: una redefinición de conceptos clásicos, como posición, velocidad y trayectoria de una partícula atómica, en función de las operaciones experimentales usadas para medirlas, una forma de operacionalismo. Sólo lo que el físico puede medir tiene significado real, y estas mediciones manifiestan siempre las relaciones de imprecisión.

Para el joven Heisenberg, el principio de imprecisión culminaba y completaba la revolución cuántica, una revolución que incorporaba sus compromisos personales con los fundamentos que él mismo había ayudado a establecer. Y, como para hacer callar toda objeción sobre este punto, concluía su artículo publicado con algunas pretensiones que iban mucho más allá del razonamiento matemático y el experimento mental. Con la teoría de transformaciones de Dirac-Jordan, declaraba, el formalismo cuántico queda completo y resulta inalterable; las relaciones de imprecisión son verdaderas e irrefutables, porque son una consecuencia directa del formalismo. Todas las observaciones experimentales anteriores y futuras de fenómenos atómicos están así sometidas a tal interpretación.

Más aún, razonaba, aunque la física cuántica contenga un elemento estadístico básico, éste no es una propiedad de la naturaleza misma. Aparece en virtud de la perturbación causada por los intentos del físico para observar la naturaleza. Finalmente, presentaba su primera afirmación explícita sobre la consecuencia más profunda de la imprecisión: un desafío a la causalidad.

El principio de causalidad requiere que todo efecto sea precedido por

## El experimento mental con el microscopio de rayos gamma

Para demostrar el principio de imprecisión, Heisenberg ofreció un experimento mental. Usando un microscopio cuya resolución era alta, por basarse en rayos gamma para su iluminación, intentó mostrar que la posición y el momento lineal del electrón obedecían al principio de imprecisión. Aunque Heisenberg logró los resultados correctos, Bohr le señaló que el experimento original descuidaba dos puntos esenciales: el poder de resolución del microscopio y la dualidad onda-corpúsculo.

En la versión correcta, un electrón libre está directamente debajo de la lente (el objetivo) del microscopio. El objetivo circular forma un cono de ángulo 2Θ con vértice en el electrón. El electrón es iluminado por un rayo gamma proveniente de la izquierda. Según un principio de óptica ondulatoria, el microscopio tiene capacidad de resolución para objetos de hasta un tamaño $\Delta x$, relacionado con Θ y con la longitud de la onda, λ, mediante la expresión

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\,\mathrm{sen}\Theta}.$$

En el momento en que la luz se difracta en el objetivo del microscopio, el electrón retrocede hacia la derecha. Después de la colisión, el rayo gamma observado podría haberse dispersado con un ángulo cualquiera dentro del cono 2Θ. En el caso extremo de dispersión hacia adelante (hacia la derecha) sobre el borde de la lente, el momento lineal en la dirección $x$ sería

$$p'_x + \frac{h}{\lambda'}\,\mathrm{sen}\Theta,$$

donde $p'_x$ es el momento lineal del electrón en la dirección $x$, $\lambda'$ es la longitud de onda del rayo gamma desviado, $h$ es la constante de Planck (que relaciona la frecuencia del fotón con su energía), y $\frac{h}{\lambda}$ es el momento lineal total del fotón rayo gamma, según lo definen los principios cuánticos. En el otro extremo, el rayo gamma se dispera hacia atrás, impactando justamente el borde izquierdo de la lente. En este caso, el momento lineal total en la dirección $x$ es

$$p''_x \frac{h}{\lambda''}\,\mathrm{sen}\Theta.$$

El momento lineal final en la dirección $x$ ha de ser en ambos casos igual al lineal; por consiguiente,

$$p'_x + \frac{h}{\lambda'}\,\mathrm{sen}\Theta = p''_x - \frac{h}{\lambda''}\,\mathrm{sen}\Theta.$$

Si Θ es pequeño, entonces es $\lambda' \sim \lambda'' \sim \lambda$,

$$p''_x - p'_x = \Delta p_x \sim \frac{2h}{\lambda}\,\mathrm{sen}\Theta.$$

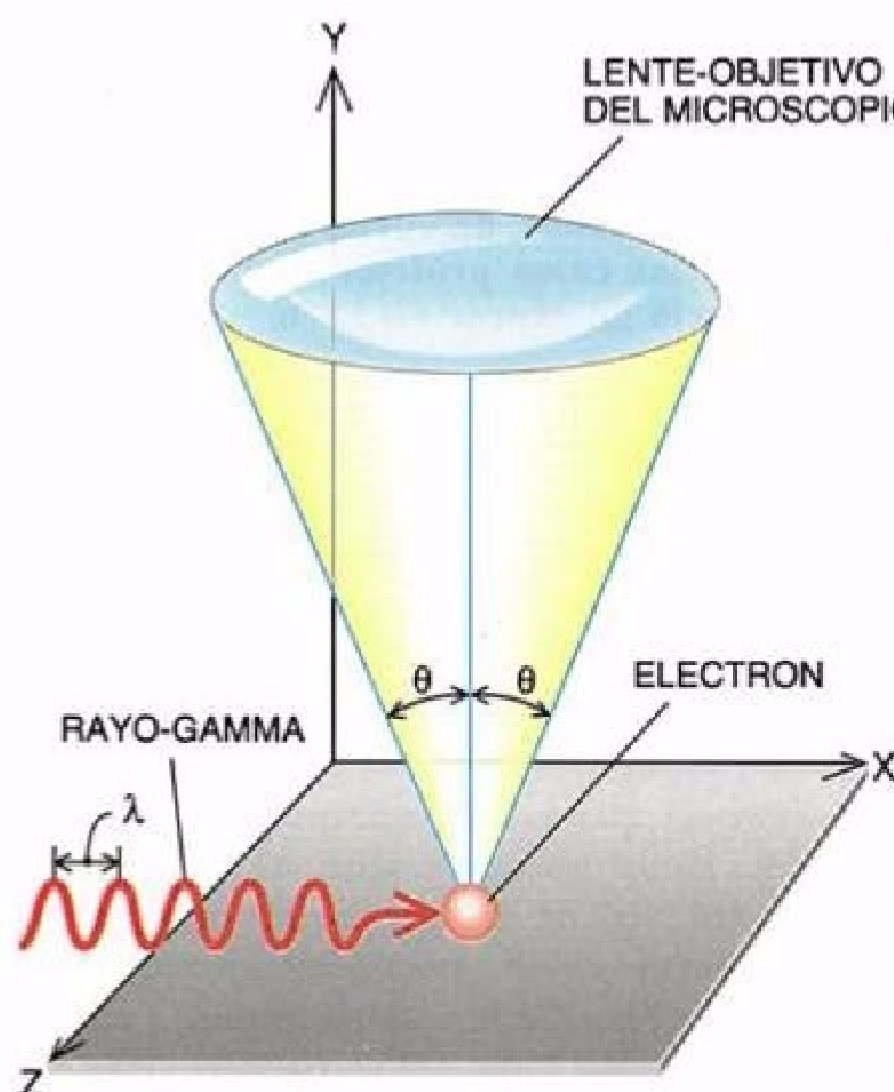
Puesto que $\Delta x = \frac{\lambda}{2\,\mathrm{sen}\Theta}$, existe una relación inversa entre la imprecisión mínima en la medida de la posición del electrón a lo largo del eje $x$ y la de su momento lineal en la dirección $x$:

$$\Delta p_x \sim \frac{h}{\Delta x}.$$

Para imprecisiones mayores que ese mínimo, puede introducirse una desigualdad

$$\Delta_x \cdot \Delta x \gtrsim h,$$

que aproxima la relación de imprecisión de Heisenberg.



una causa única. Esta idea había servido durante más de un siglo como hipótesis básica de prácticamente todas las formas de investigación racional. Se le reconoce al matemático francés Laplace la definición quizás más simple de causalidad, en su aplicación a la mecánica newtoniana: Si sabemos con exactitud la posición y el momento lineal de una partícula en un instante dado, conociéndose además todas las fuerzas que actúan sobre la partícula, su movimiento queda entonces completamente determinado por las ecuaciones mecánicas para todo el futuro.

El principio de imprecisión, asevera Heisenberg, niega eso. "En la formulación estricta de la ley causal —si conocemos el presente, podemos calcular el futuro— no es falsa la conclusión, sino la premisa." Los valores iniciales del momento lineal y la posición no pueden ser simultáneamente medidos con absoluta precisión. Razón por la cual, sólo puede calcularse una gama de posibilidades para la posición y el momento lineal de la partícula en un cierto tiempo futuro. Del movimiento real de la partícula resultará, sin embargo, una única posibilidad. La conexión causal entre presente y futuro se pierde, y las leyes y predicciones de la mecánica cuántica resultan de naturaleza puramente probabilística, o estadística.

El artículo de Heisenberg sobre el principio de imprecisión era profundo y trascendental en casi todos sus aspectos. Además de satisfacer estrictamente sus propósitos, el artículo de Heisenberg estaba "cortado a su medida". Cuando su mentor, Bohr, le señaló un error en el argumento, Heisenberg defendió su posición obstinadamente en una batalla que en la primavera de 1927 degeneró en lo que Heisenberg llamó "gran malentendido personal". El error implicaba la confianza absoluta de Heisenberg en la discontinuidad y los aspectos corpusculares del cuanto de luz, en uno de sus experimentos mentales básicos, el llamado microscopio de rayos gamma.

Bohr, que había estado de vacaciones en la nieve, se encontró sobre la mesa, a su regreso, el borrador del artículo de Heisenberg. Al enviárselo a Einstein, cumpliendo el ruego de Heisenberg, Bohr se le quejaba de que el enfoque del autor pecaba de excesiva estrechez y que el microscopio de rayos gamma era falso de arriba abajo, aunque el resultado fuera correcto. Para Bohr, las relaciones de imprecisión no surgían sólo del formalismo, de las re-definiciones de los conceptos clásicos y de la primacía de la discontinuidad y los corpúsculos sobre las ondas continuas. También eran decisivas la dualidad onda-partícula y, en el microscopio de rayos gamma, la dispersión de ondas de luz sobre el electrón dentro del objetivo del microscopio.

Las imágenes ondulatoria y corpuscular eran complementarias una de otra, descripciones mutuamente exclusivas pero conjuntamente esenciales. Bohr objetaba que el experimentador ha de elegir o la imagen ondulatoria o la corpuscular, para analizar con ella el experimento. El precio a pagar por dicha opción producía una restricción sobre lo que podía enseñarnos el experimento, limitación que venía representada por las relaciones de imprecisión. Para Bohr, el argumento de Heisenberg era tan sólo un caso particular de lo que Bohr iba llamando ya complementariedad.



4. **HEINSEBERG a los 65 años, de vuelta a Leipzig para impartir un curso de conferencias como profesor invitado. Cayó enfermo años más tarde y murió de cáncer en 1976.**

Heisenberg estaba en vehemente desacuerdo. Insistiendo en el empleo primordial de partículas y discontinuidad, rechazó de plano la sugerencia que le hizo Bohr de retirar su artículo; lo había enviado en el ínterin a su publicación. Heisenberg no podía tolerar un uso extensivo de ondas o de nociones de mecánica ondulatoria, ni podía dejar de publicar su propia y más importante contribución al debate de la interpretación. La subsiguiente batalla con Bohr se hizo tan intensa que, según se dice, durante uno de estos encuentros Werner estalló en lágrimas e incluso consiguió ofender al imperturbable Bohr con algunas observaciones duras. Evidentemente había muchas cosas en juego para el joven de 25 años: sus nuevas concepciones, sus planes académicos y quizá también su deseo de paridad intelectual con sus mentores. En mayo apareció su artículo en una de las principales revistas de física alemanas, sin ninguna revisión; sí agregaba un breve postscriptum, donde admitía el error del microscopio y llamaba la atención del lector sobre algunos puntos esenciales del razonamiento de Bohr.

Cuatro meses más tarde, Heisenberg había enjugado ya sus ojos y cambiado de tono: parecía estar agradecido por la crítica de Bohr. Tras ofrecer Bohr su primera presentación de la complementariedad ante una audiencia reunida en el lago Como en septiembre de 1927, Heisenberg, antes tan seguro de su imprecisión, brindó a Bohr el primero de sus generosos reconocimientos. En la versión publicada de la discusión que siguió al artículo de Bohr en Como, Heisenberg le agradeció por esclarecer la imprecisión "en todos sus detalles" y por enunciar lo que vino a conocerse como la interpretación de Copenhague.

El cambio de corazón en Heisenberg pudo haberse iniciado con la realización de su ambición. Porque el mismo mes del congreso de Como, se enteró de su inminente llamada a la cátedra de Leipzig. Al menos habíase cumplido esa meta.

Al apaciguarse en Heisenberg el deseo de demostrar su capacidad y sus aportaciones a la mecánica cuántica, surgió en él otro que ahora incluía a Bohr: la voluntad de crear en Leipzig un programa de investigación permanente y de primera línea, basado en la física. Además de reforzar lo defectuosamente argumentado sobre la imprecisión, las explicaciones de Bohr proporcionaban un punto de apoyo para los seguidores del danés que, como Heisenberg, estaban ansiosos por una física completa que poder propagar desde sus cátedras recién adquiridas y explotar en sus artículos. Heisenberg y otros discípulos de Bohr ya no prestaron su fidelidad a programas y descubrimientos individuales, como la mecánica matricial o la imprecisión, sino al "espíritu de Copenhague".

Heisenberg y otros consiguieron asegurar la aceptación de su interpretación, a pesar de las prolongadas objeciones de Einstein y Schrödinger. Durante la media década que siguió a la reunión de Como y el ulterior congreso Solvay, Heisenberg y su instituto produjeron teorías cuánticas muy importantes: cristales de estado sólido, estructura molecular, dispersión de radiación por núcleos, y la estructura neutrónico-protónica de los núcleos. Con otros expertos, dieron pasos de gigante hacia una teoría cuántica de campos relativista y sentaron los fundamentos de la investigación sobre física de altas energías.

Tales éxitos atrajeron a los mejores alumnos hacia institutos como el de Heisenberg. Esos estudiantes, amamantados con la doctrina de Copenhague, formaron una nueva generación de físicos, predominante, que difundieron por todo el mundo esas ideas, cuando el ascenso de Hitler al poder, en los años treinta, les obligó a emigrar y dispersarse.

Heisenberg y otros de la escuela de Copenhague no consumieron mucho tiempo en explicar su doctrina a los que no viajaron a los institutos europeos. Aquél, en particular, encontró en los Estados Unidos un campo fértil para el proselitismo. Durante una vuelta alrededor del mundo con Dirac en 1929, Heisenberg impartió en la Universidad de Chicago unas clases sobre la doctrina de Copenhague que tuvieron un enorme impacto. En el prólogo a la publicación de esas clases, escribió: "El objetivo de este libro me parece que quedará alcanzado, si contribuye de alguna manera a la difusión de este *Kopenhagener Geist der Quantentheorie*... [espíritu de Copenhague de la física cuántica...], que ha dirigido todo el desarrollo de la moderna física atómica."

El suministrador de ese *espíritu* retornó a Leipzig con sus primeros compromisos científicos, esta vez ampliamente aceptados por una profesión que le proporcionó posiciones prominentes en el aspecto institucional y en el aspecto científico. En 1933 la profesión le otorgó a Heisenberg, con Schrödinger y Dirac, el reconocimiento supremo de su trabajo: el premio Nobel.

Aunque se le celebre, con toda justicia, como uno de los físicos más eminentes de los tiempos modernos, no han faltado voces que le han criticado su comportamiento tras la subida de Hitler al poder. No militó nunca en el partido nacionalsocialista, pero ocupó cargos académicos de altísimo rango y se convirtió en interlocutor de la cultura alemana en los territorios ocupados. Rechazando repetidos ofrecimientos de emigración, dirigió el principal esfuerzo de investigación sobre la fisión del uranio para el Tercer Reich. Después de la guerra ofreció diversas explicaciones de sus actividades, que empañaron aún más su reputación en el extranjero. La enigmática yuxtaposición de ese comportamiento cuestionable y una física brillante refleja los delicados compromisos del científico y la ciencia durante un siglo turbulento y a veces brutal. Hijo leal de Alemania, Heisenberg, que veía tan profundamente en la naturaleza, encontró difícil distinguir y aceptar cuán trágicamente se había descarriado su país. Murió de cáncer de riñón y vesícula biliar en su casa de Munich en 1976.


BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE SHAKY GAME: EINSTEIN, REALISM AND THE QUANTUM THEORY. Arthur Fine. University of Chicago Press, 1986.

SCHRÖDINGER: LIFE AND THOUGHT. Walter J. Moore. Cambridge University Press, 1989.

NIELS BOHR'S TIMES: IN PHYSICS, PHILOSOPHY AND POLITY. Abraham Pais. Oxford University Press, 1991.

UNCERTAINTY: THE LIFE AND SCIENCE OF WERNER HEISENBERG. David C. Cassidy. W. H. Freeman and Company, 1991.